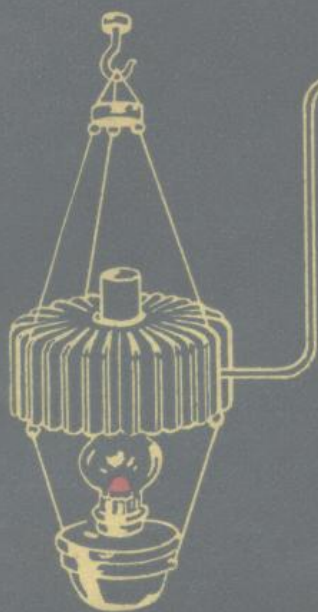
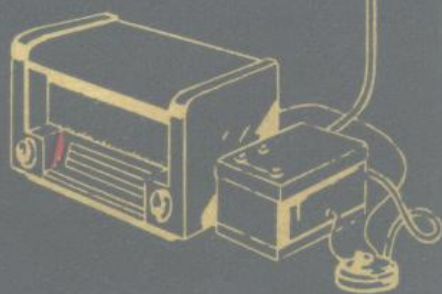




半导体

苏联科学院院士 A·Φ·约飞 著



2P7-65

序 言

19 世紀及 20 世紀初叶的电工学，以及其后的物理学曾經对金屬和电介質進行了研究，並以金屬作導电体，或將电介質作絕緣体。

近幾十年來，技術上要求解决許多問題，要解决这些問題需要許多新的方法和材料。这样便產生了各种極硬的抗热輕合金、塑料、有机玻璃、泡沫玻璃、新穎的建筑材料。除金屬及絕緣体外，在电气工業中又加入了許多半導體。

一伏电压在一立方公分金屬体内所產生的电流可达幾十萬安。而絕緣体中在相同的条件下，还不到十億分之一安。半導體使許多材料为技術服务，这些材料消除了金屬与絕緣体間的懸殊情况。

用現代物理学的方法研究半導體材料，在它們中間發現了許多曾为技術所利用过的意外特性。由於这个緣故，在科学研究工作面前，曾經提出許多新問題，这些問題的解决开辟了許多新的重要工業出路。

这样，物理学和工程学相互充实，在不到卅年內建立了一門丰富的、蓬勃發展的工業，同时並創造了嶄新的、美好的科学思潮。

只要略举幾個半導體在工業中的应用，就能看出它們在國

53.632
= 712

民經濟中的意义了。半導體可以：1) 把交流电变成直流电，2) 代替电子管放大高频振盪及發生無線电波，3) 調節电流强度及电压，4) 保护高压輸电綫，避免过压及雷击，5) 解决各种各样自动操縱及远距离控制的任务，6) 測定室内温度及照度，7) 能用訊号报告幾十里外有發光体和發热体存在，8) 不用机械，將热能变成电能，9) 利用电流放出热量或冷气，10) 集中电能及磁能，11) 將声能变成电能及將电能变成声能，12) 將紫外綫变成可見光綫以及將一种色調的光变为另一种光，13) 貯备光能，按照訊号將它重新放出，14) 作为真空無線电仪器中 强电子流的泉源，15) 將極其微弱的电子束放大到幾百万倍，16) 在化学生產中起催化剂作用，17) 作为核子微粒的計数器。

这样的例子还很多，然而从上述用途中已能估量出半導體在現代技術中各种各样的重要作用了。

同时，半導體的研究又以电气現象的新概念和新解釋充实了物理学。

國民經濟中半導體的运用以及根据半導體的研究而使進一步深入地了解其物理概念还才开始。虽然在这方面僅僅走了第一步，但是它使我們預見到在不久的將來这种發展会改变我們整个的技術面貌，会闡明固体中的电气現象。例如，可以預料到大部分蒸汽机、冷却机及發电机，甚至取暖系統將为半導體的温差电偶所代替，無線电技術將由真空电子器件过渡到半導體器件，而这样一來可把它們的尺寸和价值減小到目前的十分之

407617

幾。用很簡單的方法，就可使大多數的生產加以改進，即使它們的所有技術過程都廣泛地自動化，並由一個中心來控制它們。白天所貯備下來的光將用作晚間照明。利用日光將可發出電能，以供無線電接收機與日常其他需要之用。由某些放射性射綫中可以獲取電能。

半導體在現代物理學和技術中所佔的這種地位，和其各種潛在的可能性，都是由於它具有其它物質中沒有的特性所致。

現在我們就來試述一下這些特性，並了解一下它們的產生由來。

53.632

6

目 錄

序 言

第一章 半導体的电气性能..... 1

第二章 半導体在工業中及日常生活中的应用32

1. 整流器.....32

2. 光电阻.....40

3. 光电池.....47

4. 發光材料.....49

5. 溫差电偶.....55

6. 冷却器.....68

7. 半導体鉄磁体(鉄淦氧磁体).....73

8. 酒石酸鋇鈉和B电体.....75

9. 热变电阻(热敏电阻).....80

10. 强电场.....82

第三章 半導体学說的现代狀況.....87

第一章

半導体的电气性能

从电的观点来看，各种材料是根据它们的导电性能来区分的。至於电流我們可理解为电荷的运动。

在各种水溶液或熔解的鹽类以及許多固体物質中当电流通过时，物質本身的質点也發生轉移。在这些物質中每一个原子或原子团都帶有相同的基本电荷，这些电荷的数值已經过精确的測定。1 安电流就是在一秒鐘內移动 6.25×10^{18} 个基本电荷。1 安电流在 1 秒鐘內所移动的电量叫做庫倫。所以基本电荷等

於 $\frac{1}{6.25 \times 10^{18}} = 1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫。

在金屬中通过电流时，物質本身的原子並不随着移动。若 10 安的电流由一种金屬流向另一种金屬，持續数年，不会改变这两种金屬的成份；而如果在水溶液中，則同一电流能移动好几公斤的物質。我們把金屬中的电流看作数值上等於 1.6×10^{-18} 庫倫的电荷的运动，也就是所謂电子的运动；这些电荷在所有的金屬中都相同。在光綫或高温作用下，电子可由金屬表面逸入空气或真空中，在那里，它們的性能比在金屬体内更容易研究。事实上各电子总是相同的，並且每一个电子具有 9×10^{-28} 克的質量並帶有 1.6×10^{-19} 庫倫的負电荷。

我們知道电子可在金屬体内运动，並由一种金屬進入另一種金屬，它們的运动方向由电力的方向來決定，电子可以离开金屬表面等，所有这些情况都導向一个概念，就是电子能在金屬原子之間自由运动，像气体分子在空气中运动一样。电子与金屬的原子碰撞时，就和它們交換能量。以前人們認為由於这种能量交換的結果，电子的平均能量就与金屬原子热运动的平均能量相等。所以在通过电流时，电力所作的功經电子傳予金屬並使之發热。这样來解釋通过电流时在导体中的發热現象。

如果在金屬中有温度差存在，那末当电子由較热的金屬部分移轉到較冷的部分时，它們不僅移动自己的电荷，並且还能傳遞在那里因原子热运动而獲得的較高能量，以这种方法來平衡金屬中的温度；这种說法解釋了金屬为什么有很高的導热性。

上述这些还是 30 年前的金屬概念。然而在它們之中存在着深刻的內部矛盾。其中最重要的一个矛盾是金屬的热容量問題。既然电子獲得能量，再將它傳給金屬原子，並且像气体分子一样，随着金屬温度的增加而增加自己的动能，那末当我们加热金屬时，势必消耗很大一部分热量（將近計算值的三分之一）來提高电子的能量。但是实验証明，並非如此，金屬热容量並不顯著地超过有同样原子数的絕緣体的热容量。局部修改上述学說是不能消除这个矛盾的。只有根本改变对物質構造、一切基本質点性質（包括电子性質）的主要概念才可以。新的

金屬量子論应用了本世紀20年代才發現的电子波动學說，才完善地解釋了为什么在金屬加熱時，僅很小一部分熱消耗在提高电子能量上。原來金屬中的电子就具有很大的動能，它超过原子的平均能量几百倍，即使在絕對零度時這個能量还是保存着。

本世紀 20 年代中叶積累了大量的實驗資料，它們确切地証明，把質点当作一种充滿物質的、很小的有限体積，而和巨大的物体，例如石头、砲彈或机械零件一样，並遵循着那些力學定律，这种对質点的概念是不完全的、片面的。微粒的波动特性很明顯，这种特性在其它巨大物体中是不易覺察的。極其微小的質点流（电子流或原子流）在物体中运动時，是不像被擲出的石头那样，以一定軌道前進，而是發生散逸現象，部分反射回來，自相作用，結果在某些方向增強，在另外一些方向則減弱，好像我們所接觸到的波的傳播如光或聲的傳播一样。在波增強的地方电子積聚得很多，而在波相互削弱的地方，則电子很是稀薄。

原子的觀念也有了改变：直到1925年人們还把原子作为一种类似太陽系的小型系統，它有一个帶正電的很重的原子核，核的周圍有許多負电子依一定的軌道旋轉。电子的微粒性及波动特性發現后，这种觀念就不成立了。決定旧的原子模型中电子能的一些知道的、但令人難解的定則，是电子波动特性的自然結果。联系到这种波动特性便產生了新的量子論。無數實驗

在各方面都証實了量子論的這些以及其它許多結論。

本世紀初叶，許多物理學家都把電子想像為一種帶負電的小球，其大小約等於 2×10^{-13} 公分，它具有 9.1×10^{-28} 克質量及 1.6×10^{-19} 庫倫電荷。過去人們把電子看作物質最簡單的基本構造部分和簡單的電荷凝聚物。那時已認為電子的慣性質量是由於運動的電子如同任何電流一樣，在自己周圍形成磁場的結果。使電子加速，我們就能增強磁場，此時和加速其它具有一定質量的物體完全一樣，必須做以適當的功。這樣理解時，電子的動能就是在它運動時周圍所產生的磁場能。好像電子的全部性能僅僅限於這一點。

在1908年，列寧根據辯證唯物論的原則，在自己的著作“唯物論與經驗批判論”中曾指出——不能將電子看作宇宙的最基本元素，其中還蘊藏着無窮的秘密。

實驗光輝地証實了弗·依·列寧的這個預見。現在我們已經知道，除電荷及質量外，電子還具有一定的轉矩和磁矩。我們知道了介子，它們也具有 1.6×10^{-19} 庫倫的電荷，而它們的質量為電子的200、300、600及900倍，所以它的能量亦為電子的200、300、600及900倍；我們知道，在適當的條件下，還能產生正電荷（陽電子），它們所帶電荷於數值上與電子相等，但符號相反，它們也具有 9.1×10^{-28} 克的質量。

電子是每個原子的組成部分，它環繞着帶正電的原子核。實驗證明，儘管在極稀薄的發光氣體中的原子為數極多，但是

它們却放射出完全相同的光綫。一个原子的光振盪頻率与同一气体所有其它原子的光振盪頻率極其相似，以致在測量气体所發射的光綫波長及頻率时，誤差小於被測值的百万分之一。

量子論对这个熟知的、而又十分奇妙的事实是这样解釋的：原子中每个电子僅能处於某些一定的运动状态內，僅能由一种量子态轉变到另一种量子态，同时放射出頻率一定的光綫。

原子中电子的状态（它的能量、轉矩、磁軸方向）完全由四个量子数所决定。其中第一个叫做主量子数，用字母 n 表示，它主要說明在原子核以及其它帶电原子造成的电場中的电子能量。它同时又决定电子离核的远近，即主量子数愈高，則該电子运动的地方离核愈远，它与核的联系愈弱。主量子数只能为整数（1、2、3……），而且只能以整数改变。

第二个量子数 L 說明电子繞核运动时的轉矩，而对原子中电子的能量值影响較小。这个次量子数（軌道量子数）可有以下的数值：0（無轉矩）、1、2、3……等，但 L 永远是小于 n 的。

其余两个量子数决定电子繞核运动时所造成的磁矩方向及电子本身的轉矩（自轉轉矩）方向，而原子中电子自轉只能取两个相反方向中的一个。正如量子論所表述的那样，所有这些定則皆根据电子的波动特性而得出。於数值 $n=1$ 时，原子中电子的能量及离核的距离为最小。为了变到数值 $n=2$ ，这个电子必須由外界獲得能量。主量子数 n 值比通常大的較高能階的电子和原子叫做受激电子和受激原子；电子回复到正常状态 $n=1$

时，放出过剩的能量，这个能量或者以光的形式发射出来，或者传给其它电子。

发出的能量 ε 及放射的光线频率 ν 之间存在着正比关系： $\varepsilon = h\nu$ ，式中系数 h 在任何情况下都相等，它等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒，叫做蒲朗克常数。

最后，还发现了一个不仅为个别原子，而且为一切原子系统所具有的重要特性：每个由一定量子数表征的状态中仅能有一个电子。如果在这个状态中已经有了一个电子，那末无论这个系统怎样巨大，怎样复杂，其中不可能再有另一个具有同样量子数组的电子。

由理论及实验都证实，一个原子中仅能有 2 个主量子数 $n=1$ 及次量子数 $L=0$ 的电子；它们的自转数相等，而方向相反。在 $n=2$ 的状态中，可存在 8 个以下的 $L=0$ 及 $L=1$ 的电子；主量子数 $n=3$ 可有 18 个以下具有其它量子数值不同的电子。当我们接触到具有大量电子的原子时，这些电子成层地分佈在核的周围。在主量子数 $n=1$ ，离核最近的 K 层上有两个电子。离核较远的次层 L 上至多有 8 个电子；在 M 层上至多有 18 个电子，以此类推。电子离核愈近，它与核结合也愈紧，使电子离开原子所需的能量也愈大。外层电子与核结合最弱，当其它原子的电子离它们相当近的时候，它们受到的作用最大。此时不同原子的外层电子可以相互结合，将一些原子组成一个系统——分子。这样就产生了化合物。有些化合物中部分电子由一个原子

跳到另一个原子，填滿其适当的电子層。例如，当鋰原子（三个电子中的2个位於 K 層，僅一个电子在 L 層上）与氟原子（它共有9个电子，其中7个位於外層 L 上）相遇时，鋰的一个外層电子跑到氟原子中，在那里形成由8个电子組成的饱和層 L 。此时鋰原子失去了一个电子，变成鋰的正离子（帶有3个正的核电荷和2个电子），而氟原子則变成氟的負离子（一个帶有9个正电荷的原子核及10个电子）。在鋰离子中 K 層是饱和的，在氟离子中 L 層是饱和的。正負离子的静电吸引，使鋰离子及氟离子結合而成氟化鋰分子。

在两个原子的氢分子中，我們遇到另一种化学結合形式：两个氢原子的电子相互系合着，它們的位置对两个帶正电的氢原子核來說是对称的，以“价鍵”將它們結合起來。

構成固体的大量原子（在1立方公分中以22位数計）倒底是怎样結合成一个整体的呢？这些电子又是处於那些运动状态的呢？

在固体及液体中，如同在分子中一样，亦有各种各样的結合形式。金屬中所有原子皆失去其外層电子，而变成正离子。在各正离子間运动的負电子將它們結合成一个坚固的固态或液态金屬复合体。

在类似金剛石等的晶体中，每一个碳原子以其四个外層（ L 層）电子与离其距离相等，角度相同的四个相鄰碳原子結合。每一个原子位於其它四个原子所組成的四面体中央。四面体的

任何一面，像在氫氣中一樣，由一對電子結合着。這里與金屬不同，金屬中所有電子都組成一個統一體系，該體系中各個電子都是相同的，而這里則每對電子依一定的結晶方向，以化學價鍵結合着兩個碳離子。

岩鹽（氯化鈉）晶体中，在 M 層上有1個電子的鈉原子，它將該電子交給外層有7個電子的氯原子。這樣便產生了正的鈉離子和負的氯離子。如同以前講到的氟化鋰分子一樣，它們之中每一個離子的外層都是飽和的。異性離子的靜電吸引將它們結合成立方晶格；在立方晶格中，正負離子一個個交替地排列着。這便是離子鍵的例子。

還存在着其它形式的鍵。例如，大多數有機物晶体都由那些以堅固的價鍵或離子鍵結合着若干原子的分子所組成。而固体中分子間的鍵合力是比較差的，這種鍵合力好像在兩個氣體分子互撞時所產生的那樣微弱。在碰撞時，兩個分子的電子並不結合成一個整體，而僅在各個分子的範圍內發生位移。這種鍵合力叫做范特華（Ван-дер-Ваальс）应力。

但是無論固体或液体中分子間鍵合力的性質如何，下列量子的規律性永遠是正確的。我們以後可以看到，這些量子的規律性形成了半導體的電氣特性。

當 N 個同樣的原子結合成一個物体時，由於它們相互作用的結果，電子的每種量子狀態分裂為 N 個近似的、但終究不同的狀態。在電子的 N 個變態中，每一個都具有一定的動能和位

能，以及一定的运动方向。在每一个状态中只能有一个电子。在物体中也好，在原子中也好，电子只能以两种相互相反的方向自轉。任何一种自轉方向几乎与电子的能量無關。所以在某一能量的状态中，能够存在两个不同自轉方向的电子。

物体中电子的两种自轉方向及每种运动方向其数目相等。所以物体中全部电子的总轉矩，以及与自轉有关的总磁矩等於零。由於这个緣故，在沒有導向磁場时，整个物体並不磁化。

电子的速度也正是这样，其中每一单独的速度表現出一种电流，而总合起來时，在数值上及方向上就互相平衡，以致当沒有电場时，物体中不会呈顯任何电流。

但是在磁場中，順磁場方向的磁矩較逆磁場方向的磁矩佔优势，所以物体就磁化了。

在电場中，沿作用於它們之电力方向运动的电子受到加速，而相反方向运动的电子則受到減速。結果順电力方向的电子运动比反方向的电子运动佔优势，因而总的就出現了电流。

考慮到电子僅可能有量子运动状态，我們应当將加速想像为电子跳越到一个速度較高的、新的量子状态，將減速想像为电子跳到另一个速度較慢的量子状态，而將电流想像为相当於电子由負極至正極运动的状态比相反方向的状态多。

首先讓我們來研究一下由 N 个原子構成的固体或液体。这些原子具有飽和的外部电子層，即外層上全部可能的量子状态皆为电子佔滿着。現在我們所有的不是单独原子的每一个电子

状态，而是整个物体的 N 个量子状态；但同时物体的电子数却为一个原子中的 N 倍。所以可以推知全部量子状态也为电子所佔满。

根据量子論，在这种物体中不能產生电流。即使我們在物体中造成了电場。尽管物体中有大量电子存在，尽管每一个电子都受到电場的作用力，但各电子的运动状态是不变的。因为要使这个状态改变，必須使一部分电子的速度較高或較低或者运动方向相反。但是既然每一个可能的量子运动状态已为各电子所佔有，那末电子状态就不可能改变。無論在產生电場以前或以后，物体中从左至右、从右至左、上上下下、前前后后运动着的电子数量始終相等。換言之，电子的总电流永远等於零，虽然物体中有大量电子存在，但它还是一种絕緣体。

如果物体由外層未飽和的原子或分子所組成，例如，由以前我們所提到的鋰原子或鈉原子所組成，那就不同了。其中每一个原子的外部电子層上，只有一个电子以一定的方向自轉着，而沒有帶相反自轉方向的电子。

如果有一固体由 N 个这种原子組成，那末在除了 N 个量子状态由原子中电子的一个量子状态分裂而得者外，其中尚有 N 个量子状态，相当於相反自轉方向的电子，即总共有 $2N$ 个量子状态，而电子則僅有 N 个。構成固体的电子必定佔有 N 个能量最小的状态，此时双双具有相反的自轉方向。而其余 N 个能量較高的状态仍然空着。在一切被佔有的状态中，左右、前后、上

下运动的各种状态常是均等的。所以在这种情况下像以前一样，沒有磁場和电場时，既無磁性，也無电流。但是在电場中此等电子的性能就与上述情况有顯著的差別了。由負極向正極运动的电子，沒有任何东西可以阻撓它向較高速度的新状态轉移。假如这个新状态沒有其它电子的話，这是完全可以設想的，因为在物体中尚有大量的各种自由态在那里。这种說法僅指那些能量接近於自由态能量的电子而言。

电力也能將反場力方向运动的电子移入沿場力运动的自由态，或者漸漸將沿場力运动的电子移入其它运动速度較高的状态，也就是說，使它加速。这种物体內的电子与真空中的自由电子相类似，能够在电場作用下改变自己的运动。

事实上，在固体的原子中电子运动比真空中要复雜得多，因为固体的原子对电子运动有強烈的影响，时而吸引、时而排斥、时而加速、时而減慢，彷彿使运动难以計算。然而量子論証明，在許多原子間的电子运动平均与这种电荷的自由运动沒有区别，只是其質量有些不同而已。所以我們可以把这些电子看作为善於参加电流移动的自由电子。这种情况發生於金屬中，它們的外層电子是自由的。我們以前所述的那种物質，应將它們的电子看作不能造成电流的束縛电子，而將这些物質看作絕緣体。

我們看到，自由电子及束縛电子的概念在量子論中獲得了迥非尋常的意义。1) 当电子运动状态接近於未被其它电子所佔

有的量子状态时，則这些电子应视为自由电子。2)当电子运动状态接近於已为其它电子所佔有的量子状态时，則这些电子应视作束縛电子。这样一来，滿区的一切电子都是不導电的束縛电子。

量子論彷彿得出这样一个結論，即只可能存在兩種物質类型：帶自由电子的金屬及帶束縛电子的絕緣体。

然而我們还没有考慮到在个别的原子中除帶有最小能量的正常电子状态外，还可能有較高能量的受激态，並且电子还可能完全脫离原子。形成固体时，不僅每一个正常状态，而且每一个受激态都分裂为 N 个单独的状态。在單个的原子中，电子由外界獲得必需的能量后，可以進入受激态，在絕緣体中也是如此，电子可由完全被 N 个电子佔滿的常态滿区轉移到沒有其它电子的 N 个受激态区中的空区。

当受激区的这些电子数少於 N 个状态的总数时，这些电子就处於和它們相近的自由量子态中。因而，像我們以前所看到的那样，这些电子可以認為是自由电子，它們亦善於來傳輸电流。

促使电子由滿区轉移到“自由”受激态之能量是从那里得來的呢？物体原子的热运动可作为物体中經常的能源。如果热运动很强烈，且使电子轉入自由态所需的功不大的話，那末經常有一部分电子將为热运动帶入自由态，而此物体就变成一个導体。这些物質正是我們所叫的半導體。